

The application of structural 3D modelling using TLS datasets improves the extraction management and allows operating companies to differentiate distinct parts of a mineral deposit to be extracted with respect to different products.

TEXT Dipl.-Ing. Andreas Schumann<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Dirk Arndt<sup>2</sup>, Dipl.-Geogr. Thomas Wiatr<sup>3</sup>, Prof. Dr. Annette E. Götz<sup>4</sup>, Prof. Dr. Andreas Hoppe<sup>5</sup>

Die Anwendung von 3D-Strukturmodellierung mit Hilfe von TLS-Datensätzen verbessert das Abbaumanagement und erlaubt den Betreibern bestimmte Areale, die abgebaut werden sollen, hinsichtlich Rohstoffqualität und unterschiedlicher Produkte zu differenzieren.





# Extraction management optimisation with TLS and 3D modelling

## Optimierung des Abbaumanagements mit TLS und 3D-Modellierung

### 1 Introduction

Operating mining companies need to face today's market challenges in both economic and ecologic ways. The cost-effective production combined with a sustainable extraction management in active and future mining can be supported by the combination of the methods presented in this article. Terrestrial Laserscanning (TLS) is based on the LiDAR method (Light Detection and Ranging) and is used (1) to display the morphology, (2) to get information about layer orientations, and (3) to discriminate rock types and hence, raw material classes. Then, 3D modelling is used to combine the data gained from field work and TLS. Finally, maps can be created with different data displaying the spatial distribution of raw material quality within the mining area. The great advantage of this approach is that it can be used in areas with a "simple" geology (stratiform deposits) as well as in complex geological settings such as fault zones, graben systems and tectonically deformed areas.

### 2 Case study: Carbonate deposit in a graben system

We use the example of a carbonate deposit in central Germany. The extracted rocks belong to the so-called "Unterer Muschelkalk" (Jena Formation), which is part of the Middle Triassic. Within the succession two main rock types (lithotypes) with different geochemical composition are considerable for mining. These are the so-called:

- » "Werksteinbänke" – bioclastic beds with high CaO content and
- » "Wellenkalke" – micritic limestones with medium to high CaO content.

The under- and overlying rock formations ("Röt" and "Mittlerer Muschelkalk") are economically non-considerable because of their low CaO content. The deposit is located in a tectonic graben system characterized by structural elements such as normal faults, folds, and flexures. This makes extraction challenging with respect to the different raw material demands and requires detailed planning for ongoing mining regarding area restrictions and the amounts of excavation material, respectively.

### 3 Terrestrial Laserscanning (TLS)

In geosciences TLS is used as effective remote sensing technology for reconstruction, monitoring and obser-

### 1 Einleitung

Der Betrieb von Bergbauunternehmen ist sowohl in wirtschaftlicher als auch in ökologischer Hinsicht den aktuellen Herausforderungen des Marktes anzupassen. Eine kostengünstige Produktion zusammen mit einem nachhaltigen Abbaumanagement kann durch eine Kombination der in diesem Artikel beschriebenen Methoden unterstützt werden. Das terrestrische Laserscanning (TLS) basiert auf der LiDAR Methode (Light Detection and Ranging – Lichtlaufzeitmessung), die eingesetzt wird, um erstens die Morphologie darzustellen, zweitens Informationen zu den Lagerungsverhältnissen der Schichten zu erhalten und drittens um Gesteinsarten und damit Rohstoffklassen zu unterscheiden. Die 3D-Modellierung wird eingesetzt, um die aus Geländearbeit und TLS gewonnenen Daten zu kombinieren. Schließlich können Karten mit unterschiedlichen Daten erstellt werden, die die räumliche Aufteilung der Rohstoffqualität innerhalb des Abbaubereichs abbilden. Der große Vorteil dieser Herangehensweise liegt darin, dass sie sowohl für Gebiete mit einer „einfachen“ Geologie (schichtgebundene Lagerstätten) als auch in komplexen geologischen Strukturen, wie Verwerfungszonen, Grabensystemen und tektonisch beanspruchten Gebieten eingesetzt werden kann.

### 2 Fallstudie: Karbonatlagerstätte in einem Grabensystem

Untersucht wurde als Fallstudie eine Karbonatlagerstätte in Mitteldeutschland. Das gewonnene Gestein gehört zu dem so genannten „Unteren Muschelkalk“ (Jena-Formation), der Teil der Mittleren Trias ist. Innerhalb der Schichtenfolge können zwei Hauptgesteinsarten (Lithotypen) für den Abbau berücksichtigt werden. Dies sind die so genannten

- » Werksteinbänke – bioklastische Bankbereiche mit einem hohen Gehalt an CaO und
- » Wellenkalke – mikritische Kalksteine mit einem mittleren bis hohen Gehalt an CaO.

Die über- und unterlagernden Gesteinsformationen (Röt und Mittlerer Muschelkalk) sind wegen ihres geringen CaO-Gehalts ökonomisch uninteressant. Die Lagerstätte befindet sich in einem tektonischen Grabensystem, das durch strukturelle Elemente, wie Abschiebungen, Falten und Flexuren, charakterisiert ist. Das macht die Gewinnung zu einer Herausforderung bezüglich der unterschiedlichen Rohstoffanforderungen und bedarf daher einer detaillierten Planung für den laufenden Abbau hin-

<sup>1</sup> Bavarian Environment Agency, Department Economic Geology, Resources, Hof/Saale/Germany

<sup>2</sup> Böhlinger AG, Department GIS/Geology, Oberwil/Switzerland

<sup>3</sup> RWTH-Aachen, Neotectonics and Natural Hazards, Aachen/Germany

<sup>4</sup> Rhodes University, Department of Geology, Grahamstown/South Africa

<sup>5</sup> Darmstadt Technical University, Institute for Applied Geosciences, Darmstadt/Germany

### 1 The Optech ILRIS-3D TLS device used during the field campaign in 2010

Das TLS-Gerät Optech ILRIS-3D während der Geländekampagne im Jahr 2010



vation of geological phenomena and related hazards. TLS is used e.g. for landslide monitoring [1,2], snow avalanches mapping [3,4], rock fall reconstruction and simulation [5,6], and also for observation of landslides in open pit mining [7].

It is based on the LiDAR principle, which is a contactless, non-destructive, and non-penetrative method using coherent light with very small beam divergences to detect the recording systems surroundings. The back-scattered signal of the emitted laser beam is reflected at the surface. By the time-of-flight principle and the speed of light in a defined scan window a point cloud can be generated. For each measured point x-y-z coordinates (relative to the position of the recording system) and the range between the object and the system and the 8 bit backscattered signal (0-255) are recorded. Hence, TLS provides spatial and visual-thematic information [8].

The advantages of TLS systems are the flexible handling, a high temporal and spatial resolution of the raw data sets due to a relatively short recording time, and data acquisition in difficult accessible areas. The recorded x-y-z coordinates allow the generation of high-resolution digital elevation models (HRDEMs). The additional information gained by the backscattered signal intensity depends on surface characteristics (e.g. colour, wetness, roughness). For rocks and their backscattered signal intensity, thus the specific characteristics depend on the mineralogy and petrography, which enables new opportunities for the use of TLS data. For example, displaying backscattered signal intensities enables an additional digital mapping of layer orientations. Within the mining sector, these types of data may help to conclude on raw material quality and to discriminate different raw material classes. In the present study, the Optech Ilris-3D device was used (Fig.1).

sichtlich der Gebietsbegrenzungen bzw. der Menge des Aushubmaterials.

### 3 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

In den Geowissenschaften wird das TLS als eine effektive Fernerkundungsmethode für die Rekonstruktion, Überwachung und Beobachtung geologischer Phänomene und damit in Verbindung stehender Risiken eingesetzt. TLS wird beispielsweise für die Überwachung von Erdbeben [1,2], für die Kartierung von Schneelawinen [3,4], die Rekonstruktion und Simulierung von Steinschlägen [5,6] sowie für die Beobachtung von Erdbeben beim Tagebaubetrieb [7] angewendet.

Die Methode basiert auf dem LiDAR-Prinzip, eine berührungslose, zerstörungsfreie und nicht invasive Methode, bei der kohärentes Licht mit sehr kleinen Strahlstreuungen verwendet wird, um die Umgebung der Aufzeichnungssysteme zu detektieren. Das rückgestreute Signal des emittierten Laserstrahls wird von der Oberfläche reflektiert. Mit Hilfe des Prinzips der Lichtlaufzeitmessung und der Lichtgeschwindigkeit in einem definierten Abtastfenster kann eine Punktwolke erzeugt werden. Für jeden gemessenen Punkt werden X-, Y- und Z-Koordinaten (in bezug auf die Position des Aufzeichnungssystems) und der Bereich zwischen dem Objekt und dem System sowie das rückgestreute Signal von 8 Bit (0-255) aufgezeichnet. Somit liefert das TLS räumliche sowie visuell-thematische Informationen [8].

Die Vorteile von TLS-Systemen sind die flexible Handhabung, eine hohe zeitliche und räumlich Auflösung der Ausgangsdatensätze dank einer relativ kurzen Aufzeichnungszeit sowie die Datenerfassung in schwer zugänglichen Gebieten. Die aufgezeichneten X-Y-Z-Koordinaten gestatten die Erzeugung hochauflösender digitaler Geländemodelle (HRDEM). Die zusätzlichen Informationen, die durch die Intensität des reflektierten Signals gewonnen werden, hängen von der Oberflächenbeschaffenheit des



#### 4 Characterization of the geology with TLS and 3D modelling

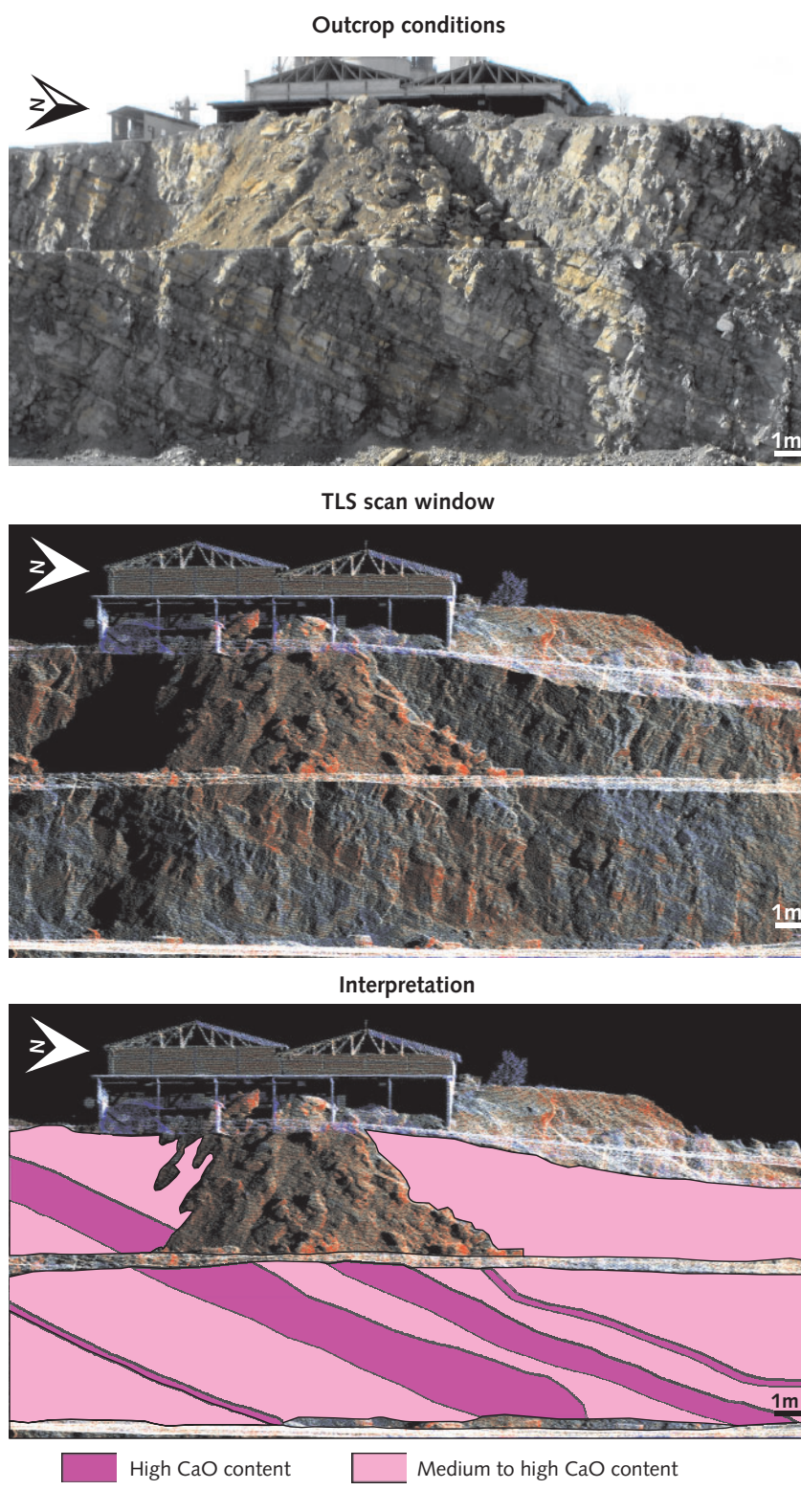
A field campaign including geological mapping and TLS was carried out in 2010 to (1) document the tectonic inventory of the deposit, (2) to measure layer orientations, and (3) to collect TLS data of the quarries morphology. The morphological setting was captured from seven scan positions with 21 different scan windows. The scanning ranges among the outcrop and the TLS system are between 50 and 400 m. The raw data set of the alignment scan sequences includes approx. 43 million points and covered an area of around 35 000 m<sup>2</sup> within the quarry. All 21 scan windows were merged and geo-referenced. The gained HRDEM of the quarry was transferred to the 3D modelling software GOCAD® and used as one type of input data for the 3D structural model. The additional displayed backscattered signal intensities are used to show differences between the main lithotypes. The CaO rich “Werksteinbänke” have higher values in backscattered signal intensities than the “Wellenkalke” with less CaO content (Fig. 2). The extraction face has e.g. colour changes due to weathering that do not give a clear insight into the lithology. Hence, it is almost impossible to discriminate layers and raw material classes. The TLS scan window of the same area with displayed ranges in backscattered signals (blue = low, grey = medium, red = high) shows rock specific reflection properties. The resulting values in backscattered signals enable a discrimination of distinct layers and serve to interpret the information gained from the TLS point cloud. Within this dataset an additional digital mapping was carried out to gain structural information (layer boundaries and orientations) in inaccessible areas, to control the precise location of data collected during field work (e.g., orientation of layers and joints), and finally to conclude on raw material classes.

The x-y-z-coordinates of the TLS point cloud (Fig. 3a) were the base for modelling the quarry's surface plane within the mining claim boundary (Fig. 3b). Together with the measured layer orientations, which are integrated as well objects in GOCAD®, and well data from former prospection drillings the stratigraphic unit planes of the deposit were modelled (Fig 3 c, d, e). Finally, the 3D model of the recent mining state was built by the intersection of the HRDEM with the stratigraphic unit planes (Fig. 3f).

#### 5 From 3D to 2D

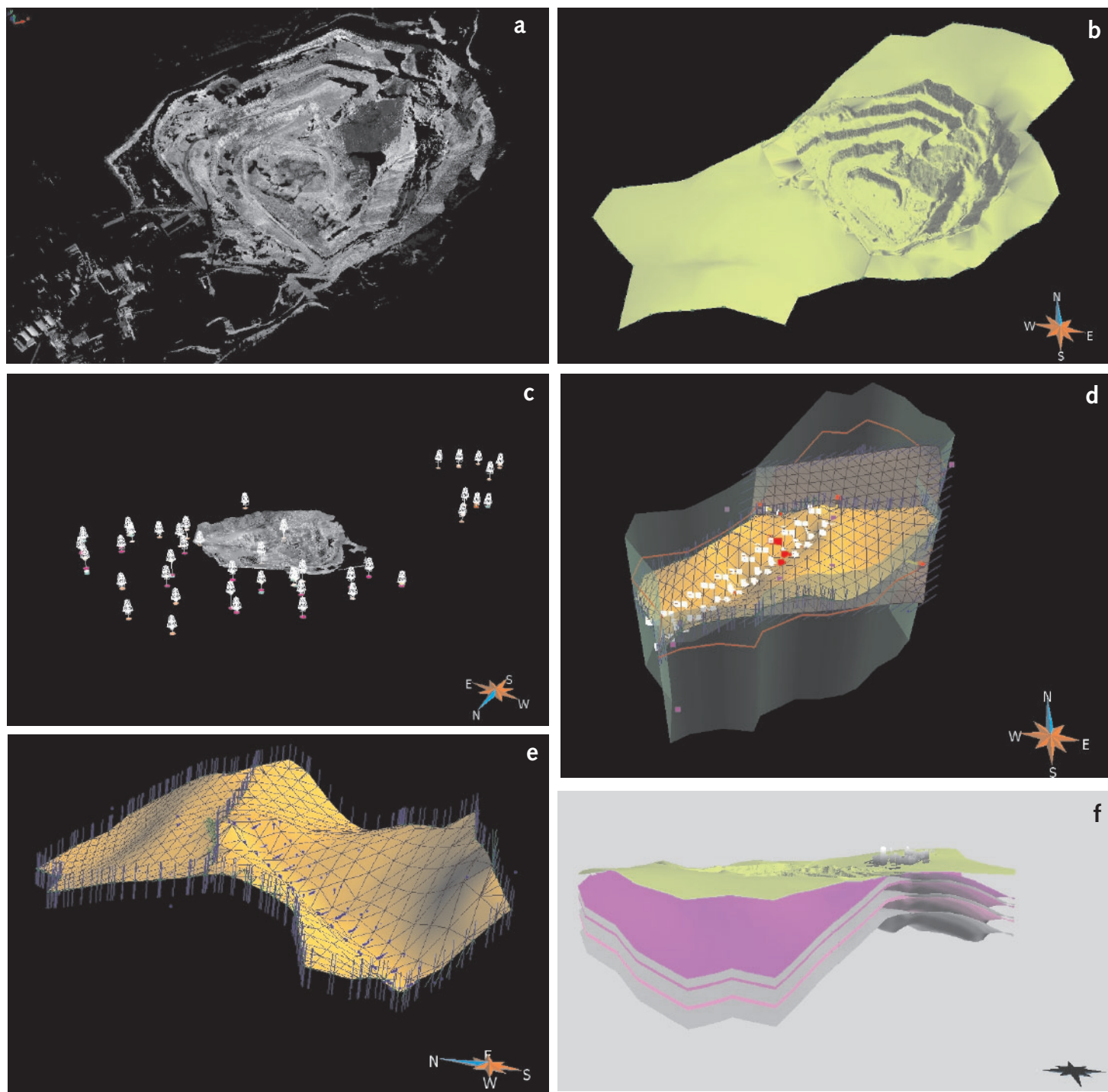
The 3D structural model serves as a database for the creation of different map types.

Each stratigraphic layer represents a homogeneous geobody and is modelled as 3D grid object, called SGrid in GOCAD®. This allows the combination of structural information and rock specific parameters and can be used to display three dimensional patterns of the integrated parameters. In the present study, the geochemical parameter “CaO content” was implemented into the SGrids. Since the product range of a lime works is not based on accurate CaO contents in percent, a relative scale for the different CaO contents of three classes is used. The “Werksteinbänke” represent the layers with



gescannten Materials ab (z.B. Farbe, Feuchte, Unebenheiten). Somit hängen die spezifischen Eigenschaften von Gesteinen und der Intensität ihres reflektierten Signals von der Mineralogie und Petrographie ab, was neue Möglichkeiten für den Einsatz von TLS-Daten eröffnet. Zum Beispiel ermöglicht die Darstellung der Intensität von reflektierten Signalen eine zusätzliche digitale Kartierung der Schichtverläufe. Im Bergbausektor können diese Arten von Daten dazu beitragen, Schlussfolgerungen zur Qualität von Rohstoffen zu ziehen und unterschiedliche

**2 Use of backscattered intensities of TLS data sets and their lithologic interpretation**  
Einsatz von reflektierten Intensitäten aus TLS-Datensätzen und ihre lithologische Interpretation



### 3 Workflow for building the 3D structural model

Arbeitsablauf für die Erstellung des 3D-Strukturmodells

the highest CaO content and thus, are grouped in class 1. The “Wellenkalke” represent class 2, and the economical non considerable overlying “Mittlerer Muschelkalk” and underlying “Röt” represent class 3. 2D maps are created out of the model (Fig. 4), showing either CaO content classes for each extraction level (geochemical maps) or structural data of the different stratigraphic layers (structure maps). Each map provides three types of information: the x-y-coordinates and either the CaO content class or the altitude (z-values). The geochemical maps were created in GOCAD® by intersecting the SGrids with the altitudes of the specific extraction level. The maps show the spatial distribution of the three CaO content classes for each extraction level. Active extraction areas can be displayed as well as different scenar-

Rohstoffklassen zu unterscheiden. Für die vorliegende Studie wurde das Gerät Ilris-3D der Fa. Optech verwendet (Bild 1).

### 4 Charakterisierung der Geologie mit Hilfe von TLS und 3D-Modellierung

2010 wurden Geländearbeiten einschließlich geologischer Kartierung und TLS durchgeführt, um erstens die tektonischen Elemente der Lagerstätte zu dokumentieren, um zweitens die Schichtlagerung ein zu messen und um drittens TLS-Daten der Steinbruchmorphologie zu sammeln. Die Steinbruchmorphologie wurde von sieben Positionen mit 21 unterschiedlichen Abtastfenstern erfasst. Die Abtastbereiche zwischen Aufschluss (Steinbruchwand) und dem TLS-System liegen zwischen 50 und 400 m. Die Aus-



ios with possible new extraction levels may be created. The structure maps are created out of the top of each stratigraphic layer.

## 6 Conclusions

The application of structural 3D modelling using TLS datasets to the mining sector is a promising method, since TLS was recently almost solely used to monitor and survey ongoing extraction and volume determination without using the additional information on signal intensities. Especially this information may support extraction planning and management, since it refers to material properties (mineralogy, petrography) and thus enables the discrimination of different raw material classes.

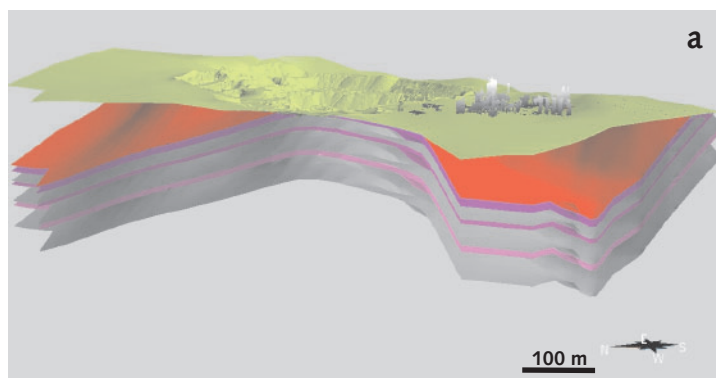
The present study shows how the additional information gained from the backscattered signal intensities

gangsdatei für die Ausrichtung der Abtastfolgen umfasst ca. 43 Mio. Einzelpunkte und erfasst ein Gebiet von etwa 35 000 m<sup>2</sup> im Steinbruch. Alle 21 Abtastfenster wurden zusammengefügt und georeferenziert. Das HRDEM wurde in die 3D-Modellierungssoftware GOCAD® implementiert und diente als eine Eingangsdatenbasis für das 3D-Strukturmodell. Die zusätzlich dargestellten Intensitäten der reflektierten Signale wurden verwendet, um die Unterschiede zwischen den Hauptlithotypen aufzuzeigen. Die Werksteinbänke mit einem hohen CaO-Gehalt besitzen höhere Werte an reflektierten Signalintensitäten als die Wellenkalke mit geringerem CaO-Gehalt (Bild 2). Die Abbauwand weist zum Beispiel auf Grund von Verwitterung Farbänderungen auf, die keinen klaren Einblick in die Lithologie vermitteln. Somit ist es fast unmöglich, Schichten und Rohstoffklassen zu unterscheiden. Das TLS

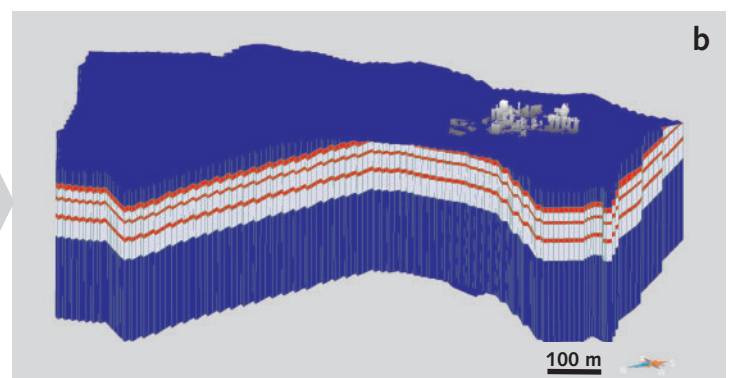
## 4 Workflow from 3D to 2D

Arbeitsablauf von 3D zu 2D

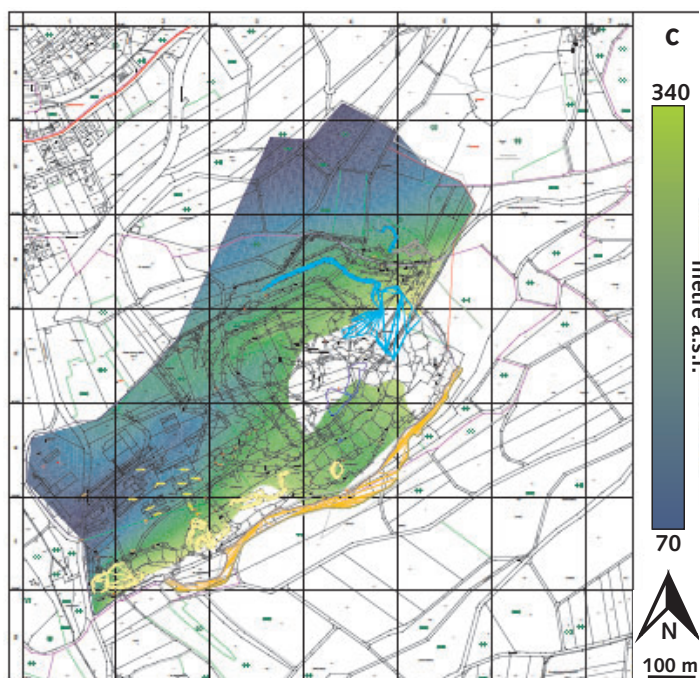
3D structural model



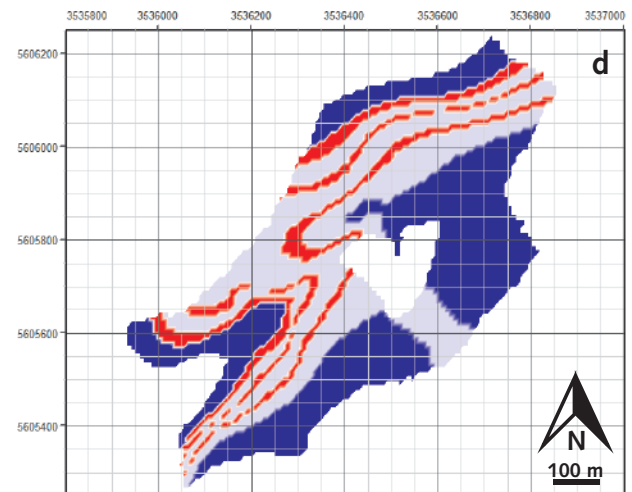
SGrid



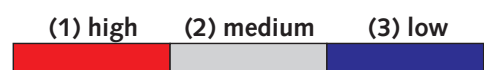
Isobath map

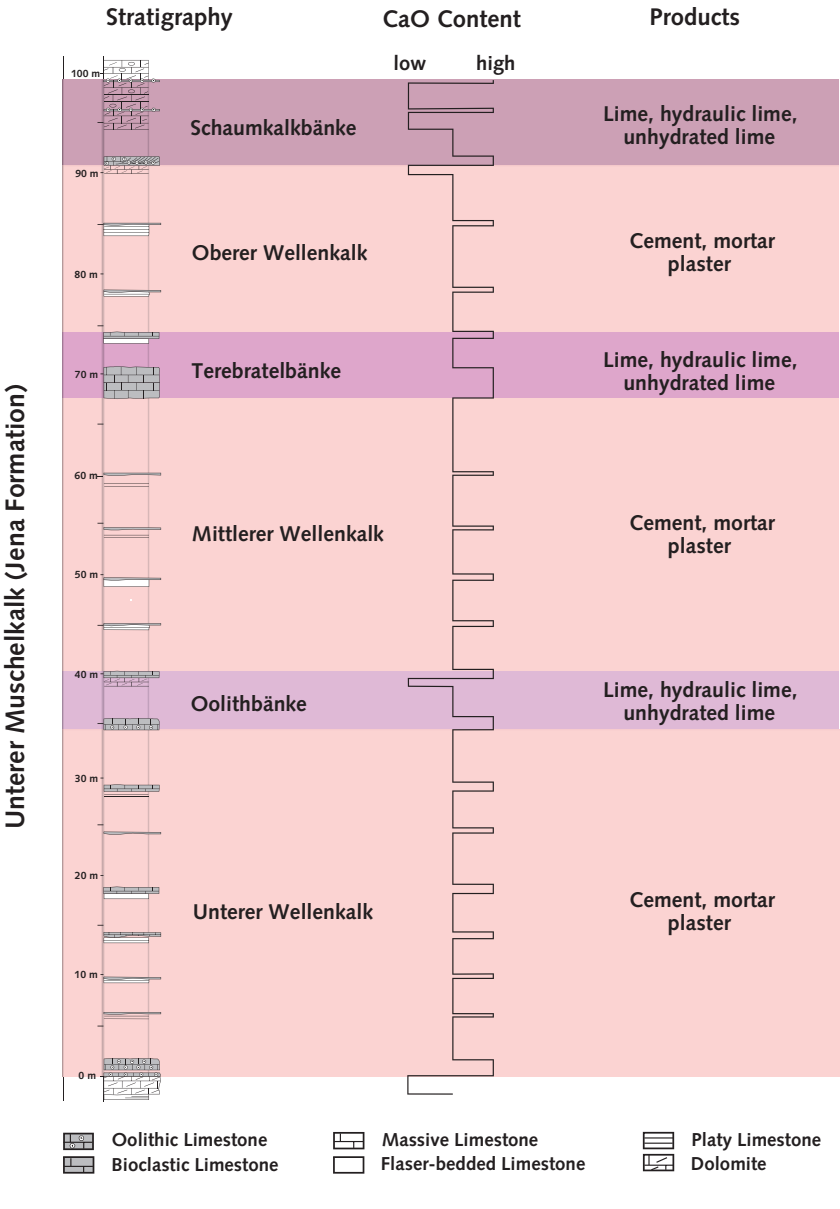


Geochemical map



CaO Content Classes





5 Stratigraphic units and their possible application

Stratigrafische Einheiten und ihre mögliche Anwendung

during TLS recording can be used within the mining sector (1) to gain more structural and spatial information as input data for 3D modelling, (2) to evaluate structural data from field work, and (3) to conclude on the raw material quality. The interpretation of structures is directly carried out during the 3D modelling process and serves to specify layer orientations in the 3D structural model by using layer specific backscattered intensities. It also allows the digital mapping of inaccessible areas, which minimizes potential risks during field campaigns, e.g. for further explorations and prospections, respectively. The intensities allow an additional discrimination of the raw material quality due to different lithotypes. For most third party users 2D maps are essential for their work. Here, the 3D structural model enables a flexible creation of maps with detailed information on geometry and geochemical properties. These maps allow operating companies to differentiate distinct parts of a mineral deposit to be extracted with respect to different products (e.g., cement, mortar, plaster; see Fig. 5). Hence, the application of our approach enables minimization of the amount of excavated material and supports the ex-

Abstastfenster des gleichen Gebiets mit dargestellten Bereichen reflektierter Signale (blau = gering, grau = mittel, rot = hoch) zeigt gesteinspezifische Reflektionseigenschaften. Die aus reflektierten Signalen gewonnenen Werte gestatten eine Unterscheidung zwischen einzelnen Schichten und lassen eine Interpretation direkt aus der TLS Punktwolke zu. Mit diesen Datensätzen wurde eine zusätzliche digitale Kartierung vorgenommen, um strukturelle Informationen (Schichtgrenzen und -orientierungen) von unzugänglichen Gebieten zu erhalten, um die Lagepunkte der während der Feldarbeit gewonnenen Daten (z.B. Ausrichtung von Schichten und Klüften) zu kontrollieren und um schließlich Schlussfolgerungen zu Rohstoffklassen zu ziehen.

Die X-Y-Z-Koordinaten der TLS-Punktwolke (Bild 3a) waren die Grundlage für die Modellierung der Steinbruchoberfläche innerhalb der Grenzen des Abbaubereichs (Bild 3b). Zusammen mit den gemessenen Schichtorientierungen, die als Bohrungen in GOCAD® integriert sind, und Informationen aus früheren Prospektionsbohrungen wurden die Schichtflächen der stratigraphischen Einheiten modelliert (Bilder 3c, d und e). Schließlich wurde das 3D-Modell des aktuellen Abbauzustands durch Verschneidung des HRDEM mit den Schichtflächen der stratigraphischen Einheiten erstellt (Bild 3f).

5 Von 3D zu 2D

Das 3D-Strukturmodell dient als Grundlage für die Erstellung unterschiedlicher Kartenarten.

Jede stratigraphische Schicht stellt einen homogenen Geokörper dar und wird als 3D-Gridobjekt modelliert, das in der Software GOCAD® als SGrid bezeichnet wird. Das gestattet die Kombination von strukturellen Informationen und gesteinspezifischen Parametern und kann für die Darstellung der dreidimensionalen Verteilungsmuster der integrierten Parameter eingesetzt werden. In der vorliegenden Studie wurde der Parameter „CaO-Gehalt“ in die SGrids implementiert. Da die Produktpalette eines Kalkwerks nicht auf dem genauen CaO-Gehalt in Prozent basiert, wird eine relative Skala für die unterschiedlichen CaO-Gehalte der drei Klassen verwendet. Die Werksteinbänke stellen die Schichten mit dem höchsten CaO-Gehalt dar und werden daher in die Klasse 1 eingeordnet. Die Wellenkalken stellen die Klasse 2 dar, und der ökonomisch uninteressante Mittlere Muschelkalk im Hangenden und der Röt im Liegenden bilden die Klasse 3. Aus dem Modell werden 2D-Karten angefertigt, die entweder die Klassen des CaO-Gehalts für jedes Abbauniveau (geochemische Karten) oder die Strukturdaten der unterschiedlichen stratigraphischen Schichten (Strukturkarten) zeigen (Bild 4). Jede Karte vermittelt drei Arten von Informationen – die X-Y-Koordinaten und entweder die Klasse des CaO-Gehalts oder die Höhe (Z-Werte). Die geochemischen Karten wurden in GOCAD® durch Verschneiden der SGrids mit den Höhen des spezifischen Abbauniveaus erstellt. Die Karten zeigen die räumliche Verteilung der drei Klassen der CaO-Gehalte für jedes Abbauniveau. Es können sowohl aktiv betriebene Abbaugelände dargestellt werden als auch unterschiedliche Szenarien mit möglichen neuen Abbauniveaus. Die Strukturkarten werden aus der Oberkante einer jeden stratigraphischen Schicht kreiert.

traction management planning in both ongoing mining and future extraction. Lithologic and geochemical data from field work and laboratory analyses (left columns) show a cyclic stacking pattern of the “Unterer Muschelkalk” succession. The “Werksteinbänke” are subdivided in Oolithbänke, Terebratelbänke and Schaumkalkbänke. This information may be visualized in 2D maps and 3D models to define economically exploitation with respect to different products (right column). Third party users obtain a structured overview of the CaO pattern in the stratigraphic succession and additional information on the favoured products for each unit.

## REFERENCES

- [1] Travelletti, J., Oppikofer, T., Delacourt, C., Malet, J.-P. & Jaboyedoff, M. (2008): Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII (Part B5), Beijing (ISPRS)
- [2] Prokop, A. & Panholzer, H. (2009): Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. – Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9: 1921–1928, Göttingen (EGU)
- [3] Deems, J.S., Fassnacht, S.R. & Elder, K.J. (2006): Fractal distribution of snow depth from LIDAR data. – Journal of Hydrometeor., 7 (2): 285–297, Boston (AMS)
- [4] Trujillo, E., Ramirez, J.A. & Elder, K.J. (2007): Topographic, meteorologic and canopy controls on the scaling characteristics of the spatial distribution of snow depth fields. – Water Resources Research, Vol. 43: 1–17, Washington (AGU)
- [5] Abellan, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T. & Vilaplana, J.M. (2009): Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. – Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9: 365–372, Göttingen (EGU)
- [6] Nguyen, H.T., Fernandez-Steeger, T.M., Wiatr, T., Rodrigues, D. & Azzam, R. (2011): Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes – an example from Madeira island (Portugal) – Nat. Earth Syst. Sci., 11: 1–11, Göttingen (EGU)
- [7] Hu, H., Fernandez-Steeger, T.M., Azzam, R., & Arnhardt, C. (2009): 3D Modeling of Landslide in Open-pit Mining on Basis of Ground-based LIDAR Data. – In: General Assembly of the European Geosciences Union 2009, 19–24 April 2009, Vienna (Austria), Geophysical Research Abstracts, 11, (EGU2009-5378)
- [8] Mettenleiter, M., Härtl, F., Frölich, C. & Langer, D. (2000): Imaging Laser Radar for 3D Modeling of Real World Environments. – Intern. Conf. OPTO/IRS2/MTT, May 9–11, Erfurt, Germany (AMA)

## 6 Schlussfolgerungen

Die Anwendung der 3D-Strukturmodellierung mit Hilfe von TLS Datensätzen ist eine vielversprechende Methode. Bis vor kurzem wurde das TLS fast ausschließlich eingesetzt, um den laufenden Abbau und die Volumenbestimmung zu überwachen und zu vermessen, ohne die zusätzlichen Informationen aus den Signalintensitäten zu nutzen. Besonders diese Informationen können die Abbauplanung und -durchführung verbessern, da sie auf Materialeigenschaften (Mineralogie, Petrographie) beruhen und so die Unterscheidung von Rohstoffklassen ermöglichen.

Die vorliegende Studie zeigt, wie erstens die zusätzlichen Informationen aus den reflektierten Signalintensitäten während der TLS-Aufnahme im Bergbausektor verwendet werden können, um mehr strukturelle und räumliche Informationen als Eingangsdaten für die 3D-Modellierung zu gewinnen. Zweitens können Strukturdaten aus der Feldarbeit bewertet werden, und drittens können Schlussfolgerungen zur Rohstoffqualität gezogen werden. Die Interpretation von geologischen Strukturen wird direkt während des Modellierungsprozesses durchgeführt und dient der Bestimmung der Schichtorientierung im 3D-Strukturmodell durch den Einsatz der schichtspezifischen reflektierten Intensitäten. Zudem gestattet sie die digitale Kartierung von unzugänglichen Gebieten, was potentielle Risiken während der Geländearbeiten minimiert, z.B. für die weitere Erkundung bzw. Prospektion. Die Intensitäten der reflektierten Signale erlauben eine zusätzliche Unterscheidung der Rohstoffqualität auf Grund unterschiedlicher Lithotypen. Für die meisten Drittnutzer sind 2D-Karten für ihre Arbeit wichtig. Hier ermöglicht das 3D-Strukturmodell eine flexible Erstellung von Karten mit detaillierten Informationen zur Geometrie und zu geochemischen Eigenschaften. Diese Karten gestatten den Betreibern, zwischen den einzelnen Teilen einer Minerallagerstätte zu unterscheiden, die für unterschiedliche Produkte abgebaut werden sollen (z.B. Zement, Mörtel; s. **Bild 5**). So ermöglicht die Anwendung unserer Methode, die Menge des Aushubmaterials zu minimieren und unterstützt darüber hinaus die Planung des Abbaumanagements sowohl im laufenden Bergbaubetrieb als auch für einen zukünftigen Abbau. Die lithologischen und geochemischen Daten aus der Geländearbeit und Laboranalysen (linke Spalten) zeigen ein zyklisches Stapelungsmuster der Abfolge des Unteren Muschelkalk. Die Werksteinbänke sind in Oolithbänke, Terebratelbänke und Schaumkalkbänke unterteilt. Diese Informationen können in 2D-Karten und 3D-Modellen visualisiert werden, um einen Abbau hinsichtlich unterschiedlicher Produkte ökonomisch zu definieren (rechte Spalte). Drittnutzer erhalten einen strukturellen Überblick über das CaO-Muster in der stratigraphischen Abfolge sowie zusätzliche Informationen zu den favorisierten Produkten einer jeden Einheit.